

工业管道焊接变形控制策略研究

郭毅

山东省显通安装有限公司，山东肥城，271600；

摘要：本文旨在探索工业管道焊接变形的控制策略，通过系统分析热输入不均匀性、材料特性、结构设计、焊接工艺、外部环境等因素对焊接变形的影响，发现焊接变形的发生具有一定的复杂性和多因素关联性。在此基础上，本文提出了包括焊接工艺优化、参数控制、结构设计改进、预热与后热处理、工艺模拟与监测、以及自动化和智能化技术应用等一系列控制策略，为工业管道焊接工程提升焊接质量、延长管道使用寿命、降低维护成本提供了一定的学术参考建议。

关键词：工业管道焊接；焊接变形；控制策略；焊接工艺

DOI：10.69979/3029-2727.24.07.024

引言

工业管道作为工业生产和基础设施建设的重要组成部分，其焊接质量直接关系到管道的安全性、稳定性和使用寿命长短^[1]。然而，在焊接过程中，由于热输入的不均匀性和材料的热胀冷缩效应，焊接部位容易产生焊接变形。这种变形不仅会影响管道的尺寸精度和连接质量，还可能导致焊接位置应力集中，进而降低管道的承载能力和使用寿命。尤其在高温高压工况下，焊接变形问题更加突出。因此，对工业管道焊接变形的影响因素进行系统分析，并由此探索科学有效的控制策略，是提高工业管道焊接质量、减少材料浪费、降低管道维护成本的关键措施之一。

1 工业管道焊接工艺概述

工业管道焊接工艺是连接管道系统中各类管件与部件的关键技术之一，该工艺的技术目的是通过焊接工艺达成管道系统的密封性、强度和耐久性等一系列性能要求^[2]。该工艺在实操中主要需要利用热源（如电弧、激光、氩弧等）使管道材料在接头部位熔化，冷却后形成牢固的接头。常见的焊接工艺包括手工电弧焊（SMAW）、钨极氩弧焊（GTAW/TIG）、熔化极气体保护焊（GMAW/MIG）、埋弧焊（SAW）等，具体工艺选择通常需要根据材料种类、管道规格、使用环境和其他技术要求来综合确定。

工业管道焊接一般具有以下技术特点：一是工业管道焊接工艺精密性要求高，管道焊接需要保证接头的密封性和强度，特别是在高压、高温和腐蚀性环境下，要确保焊接部位的牢固可靠。二是实际操作环境复杂，管道焊接常涉及狭窄空间、高空作业或特殊介质等多变环境，在焊接中还需借助一些特殊工艺来保障焊接部件的

综合质量，传统实操会相对比较困难^[3]。三是焊接工艺多样化，在实操中焊接人员需要根据管道材料（如碳钢、不锈钢、合金钢）和厚度综合选择更加适宜的焊接方法，并对焊接参数进行精确控制。此外，现代工业管道焊接也逐渐采用了一些自动化和智能化技术，利用自动焊接设备和监测系统提升焊接效率与焊接一致性。

2 工业管道焊接变形影响因素分析

工业管道焊接过程中，焊接变形是一种普遍存在且难以完全避免的工业现象，其成因可谓复杂，与多种影响因素密切相关。

2.1 热输入不均匀性

热输入是焊接过程中最重要的影响因素之一，热输入的均匀程度直接决定了焊缝及周边区域的加热与冷却速度^[4]。在焊接过程中，热输入的不均匀性会导致材料局部受热膨胀与冷却收缩速度不同，从而产生残余应力和焊接变形。当热输入量较大时，热影响区（HAZ）范围增大，焊接变形就会更为严重；而热输入量不足则可能会导致焊缝熔合不良。因此，在工业管道焊接中要重点保持住焊接热输入的控制水平。

2.2 材料特性

焊接材料的热物理性能对焊接变形的发生及变形程度也同样起着重要作用。例如，不同材料的热膨胀系数、导热率、弹性模量等物理参数差异明显，而热膨胀系数较大的材料也更容易因温度梯度而产生较大的变形。此外，高强度钢和合金材料虽然具有较高的承载能力，但其焊接热裂纹敏感性较高，焊接变形也会更加难以控制。因此，材料特性是焊接工艺选择及变形控制策略制定的重要考量因素之一。

2.3 结构设计

管道结构设计的特点对焊接变形的影响同样不容忽视。首先,焊接接头的设计形式(如对接焊缝、角接焊缝、搭接焊缝等)会直接决定热输入的分布特性和焊接变形的集中区域。其次,管道的几何形状(直管、弯管、分支管道等)及刚性约束条件也会直接影响到焊接变形的大小和分布情况。例如,管径较大、壁厚较薄的管道焊接过程中自然就更加容易产生横向或纵向弯曲变形,而刚性约束较强的管道结构则可能会因为受力集中问题而引发较大的残余应力。

2.4 焊接工艺

焊接工艺的选择及参数控制对焊接变形也有一些直接影响。例如,焊接过程中当焊接速度较慢时,焊接过程的热输入量就会增大,就可能会导致焊接变形加剧的情况发生;而焊接速度过快,则可能会导致焊缝未完全熔合或气孔、裂纹等缺陷发生。此外,焊接顺序的合理规划会造成焊接变形的不良结果,一般情况下,合理的焊接顺序可以通过平衡热输入来减小变形,而不合理的焊接顺序则可能会加剧焊接变形的情况发生。从实践结果来看,自动化焊接技术在一定程度上可以提高焊接的一致性,减小人为因素对焊接变形的影响,算是一种比较高效的变形控制方向。

2.5 外部环境影响

在工业管道焊接的过程中,焊接操作环境往往复杂多变,会出现如在高空、狭小空间或高温、高湿等条件下进行焊接施工的情况,在如此情况下,焊接变形的控制难度自然就会显著增加。此外,焊接过程中环境温度、湿度和风速等外部条件也可能对焊接热输入的均匀性及材料冷却速度产生一定的影响,从而间接导致焊接变形问题的形成^[5]。

2.6 焊接前后处理的问题

焊接前的准备工作(如坡口加工质量、装配间隙控制)及焊接后的处理工作(如消除应力热处理、冷却方式)对焊接变形也同样具有重要的影响。例如,焊接前坡口加工不均匀或装配间隙过大,就可能会导致焊缝金属体积增加,从而加剧焊接变形;而焊接后如果把不及时进行必要的热处理就可能会使残余应力无法释放,从而导致焊接变形现象长期存在。

3 工业管道焊接变形控制策略探究

焊接变形是工业管道焊接过程中常见且难以避免的问题。对焊接变形的控制不仅需要从焊接工艺、焊接参数、结构设计、材料特性等多个方面入手,还需要综合运用各种先进的技术手段,确保将焊接变形成功控制

在合理范围内。

3.1 焊接工艺优化

优化焊接工艺是控制焊接变形的基础环节之一。选择合适的焊接方法和焊接流程,可以有效降低热输入的不均匀性,从而减少焊接变形的发生。例如,GTAW(钨极氩弧焊)适用于薄壁管道的精密焊接,因其热输入量小且焊接稳定性高,能有效控制焊接变形。而对于厚壁管道,则可以采用GMAW(熔化极气体保护焊)配合多道焊技术,通过多层多道焊工艺逐层施焊,分散热输入,降低热集中效应。在焊接过程中,还可以选择一种对称焊接工艺进行优化施工,通过对称位置的焊接作业,可以平衡焊接区域的热应力分布,防止局部热膨胀和收缩导致的变形。例如,在长直管的焊接中,可采用两端同时进行对称焊接的方式,保证管道整体受热均匀。此外,对于管道焊接中的复杂接头,还可以通过分段焊接或分步焊接技术,避免大面积热输入对管道结构的影响。焊接工艺的优化需要根据具体材料、环境和工况进行调整,特别是在恶劣环境下(如高温、高压或腐蚀环境),焊接方法的选择尤为重要。现代焊接工艺还可结合自动化技术进一步提升质量和效率。例如,在焊接中,可以使用自动化轨道焊接设备对长距离管道进行焊接,从而显著提高焊接一致性,还能通过编程精准控制热输入和焊接速度,从而有效减少焊接变形问题的发生。

3.2 焊接参数控制

焊接参数(如电流、电压、焊接速度、热输入量等)的优化与精确控制是焊接变形控制的核心策略之一。在焊接之前对焊接参数进行科学调整,可以显著改善焊接过程中的热输入分布,进而减少焊接变形问题的发生。例如,焊接电流的大小直接影响熔池的温度和焊接热输入量,过大的电流会增加热输入,导致焊接区域热影响区扩大,增加变形风险;而焊接电流不足则可能会引发焊缝熔合不良等缺陷,因此在焊接前就要结合实际情况对焊接电流设定进行优化调整。再比如,焊接速度对焊接变形的影响也同样显著。因为过快的焊接速度会使材料受热时间不足,从而影响焊接接头的熔合质量;而过慢的焊接速度则会增加热输入,扩大热影响区,导致更严重的焊接变形。因此,在实际操作中,应根据管道的材质、壁厚和接头形式,选择合适的焊接速度。

3.3 结构设计改进

管道结构设计的合理性对焊接变形的控制同样具有重要影响。在焊接设计阶段,需要优化接头形式、坡口设计以及整体结构布局,从而显著降低焊接变形的发生概率。例如,合理的坡口设计可以有效减少焊接材料的填充量,从而降低焊接热输入的集中程度,避免因过

大热输入而引发的局部变形。常见的坡口形式包括 V 形坡口、X 形坡口和 U 形坡口，在结构设计时要充分根据管道壁厚和材料特性选择合适的坡口形式。在焊接过程中，还可以通过临时固定装置对结构进行加强，减小因热胀冷缩而产生的焊接变形。例如，焊接人员可以利用夹具或定位销对焊接部件进行固定，从而显著降低焊接过程中因结构移动或热应力不均匀而引发的变形。此外，对于薄壁管道，焊接施工可以采用内撑工艺来提供额外的支撑力，防止焊接过程中管道发生径向变形。而对于复杂结构的管道系统，例如分支管或弯管部分，则可以在焊接前通过计算机模拟优化焊接顺序与布局，避免因不合理的设计导致局部焊接变形集中。在设计阶段，为了减少焊接变形风险，还可以引入有限元分析（FEA）技术，对焊接热场和应力场进行细致的仿真分析，从而预测潜在的变形问题并提前优化设计方案。

3.4 预热与后热处理

焊接前的预热操作和焊接后的热处理过程也是控制焊接变形的重要辅助措施之一。预热可以减少焊接区域的温差，降低材料的热膨胀梯度，从而有效控制焊接变形的程度。尤其对于高强度钢、低合金钢等焊接裂纹敏感性较高的材料，预热可以降低焊接应力集中的发生概率，减少裂纹和变形的风险。预热的具体温度需要根据材料种类、厚度以及焊接方法确定，一般可通过局部预热或整体预热的方式实施。焊接后的后热处理操作也同样重要，主要包括去应力热处理、退火处理和正火处理等方法。去应力热处理可以有效消除焊接残余应力，防止管道长期使用中因应力集中而引发的变形和开裂问题。退火处理则可以提高焊接接头的韧性和稳定性，同时减少焊接部位的内应力。此外，对于特殊工况下使用的管道，如在高温、高压环境中运行的管道系统，后热处理还可以进一步提高其抗变形能力和长期使用性能。

3.5 工艺模拟与监测

利用现代仿真技术对焊接过程进行工艺模拟也是提前预测和控制焊接变形的重要手段。例如，有限元分析（FEA）技术就可以模拟焊接过程中热输入、温度场和应力场的分布情况，提前预测焊接变形的可能性，为焊接工艺优化提供重要的数据支持，特别是在大型复杂管道系统中，工艺模拟可以利用自身的数据分析模型有效帮助工程师制定更加科学合理的焊接策略。在焊接实际操作中，焊接人员还可以借助先进的监测设备实现对焊接变形的实时控制。例如，焊接人员可以利用热成像技术实时记录焊接区域的温度分布，帮助操作人员掌握焊接热输入的均匀程度，避免部分位置过渡热集中问题

发生。焊接人员还可以利用变形监测传感器捕捉焊接过程中管道结构的位移和应变情况，及时发现潜在的变形问题，从而提高焊接的质量和一致性，减少因焊接变形导致的返工率问题。

3.6 自动化与智能化技术应用

随着工业 4.0 时代的到来，自动化与智能化技术在工业管道焊接中的应用也日趋广泛。这些智能技术不仅可以有效提高焊接工程的焊接效率，也可以为焊接变形的控制提供全新的技术手段。比如，自动焊接机器人就可以通过高精度的运动控制和参数调节，显著减少焊接过程中因人为因素引起的变形问题。例如，轨道焊接机器人可以用于长距离的直管焊接，其精确的运动轨迹和稳定的热输入可以大幅提高焊接的一致性。此外，智能监控系统则可以实时采集焊接过程中的温度、应力和变形数据，通过人工智能算法进行分析和优化，从而实现对接过程的全面控制。例如，智能焊接系统可以根据实时监测数据动态调整各种焊接参数，包括电流、电压和焊接速度等重要参数内容，从而在焊接过程中持续优化热输入分布，最大限度地减少焊接变形情况的发生。

4 结语

工业管道焊接变形是影响焊接质量和管道长期使用性能的重要问题，其成因复杂，涉及热输入、材料特性、结构设计、焊接工艺等多方面因素。通过深入分析焊接变形的主要影响因素，并采取焊接工艺优化、参数控制、结构设计改进、热处理措施及现代技术应用等综合控制策略，可以有效减小焊接变形的发生概率，提高工业管道焊接质量，降低管道维护成本。未来，我们应进一步加强对焊接变形控制技术的研究与实践，加强智能化与自动化技术在焊接变形控制中的应用，从而使焊接工程逐渐满足工业生产对高质量焊接工艺的更高需求。

参考文献

- [1] 张玉. 工业管道安装过程中的焊接缺陷及预防措施[J]. 建材发展导向, 2024, 22(06): 106-108.
- [2] 陈小虎. 浅谈工业管道安装过程中的焊接缺陷及预防措施[J]. 中国设备工程, 2021, 15): 119-120.
- [3] 任瑶. 工业管道安装过程中的焊接缺陷及预防措施[J]. 设备管理与维修, 2021, (11): 101-102.
- [4] 李军, 边绍雷. 工业管道安装过程中的焊接缺陷及预防措施分析[J]. 中国科技投资, 2021, (09): 175-176.
- [5] 牛朋飞. 工业管道安装过程中的焊接缺陷及预防措施[J]. 工程技术研究, 2020, 5(04): 208-209.